

Análise e reforço de coberturas tradicionais

Jorge M. Branco

ISISE, Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho, Guimarães

jbranco@civil.uminho.pt

SUMÁRIO

Apresentam-se alguns dos resultados recolhidos nos últimos anos no estudo do tema coberturas tradicionais de madeira. Tendo por base um levantamento exaustivo de vários exemplos, analisou-se o comportamento global das coberturas tradicionais de madeira, estudando a influência de parâmetros específicos bem como o efeito de alguns erros diagnosticados na fase de levantamento. De seguida, apresenta-se as principais conclusões de uma campanha experimental realizada com vista ao estudo do comportamento de ligações tradicionais de madeira, avaliando o efeito do seu reforço com elementos metálicos. Finalmente, apresentam-se alguns resultados de um ensaio de uma asna de madeira à escala real realizado em laboratório.

PALAVRAS-CHAVE: COBERTURAS, ASNAS, LIGAÇÕES, REFORÇO

1. INTRODUÇÃO

Em Portugal, a construção de coberturas de madeira, após numerosos séculos de uso e aperfeiçoamento, perdeu o seu fulgor com o aparecimento do aço e do betão. Até então, a forma mais fácil de cobrir habitações, igrejas, monumentos, armazéns, fábricas, etc. recorria à utilização de madeira. A madeira era então um recurso disponível, fácil de trabalhar e a mão-de-obra qualificada era abundante. Com o aparecimento de novos materiais e com a industrialização, a madeira deixou praticamente de ser utilizada. Estruturas como as asnas exigiam mão-de-obra qualificada para a execução de entalhes, o que não era mais comportável numa indústria preocupada em produzir em quantidade e a preços reduzidos. Passou então a ser conotada como um material pobre, que do ponto de vista estrutural servia apenas para aplicações provisórias. A sua não utilização levou à perda de praticamente todo o conhecimento adquirido ao longo dos séculos.

Curiosamente, hoje em Portugal, a exemplo de outros países Europeus, assiste-se a um retorno à utilização de asnas de madeira, seja para reconstrução de património degradado, seja para construções novas. A madeira continua a ser um material barato e de fácil obtenção. As suas capacidades estruturais são comprovadas pelos inúmeros exemplos que chegaram até aos nossos dias, e as suas capacidades arquitetónicas voltam a despertar o interesse. Sem esquecer que as atuais preocupações ecológicas e de sustentabilidade da construção recolocam a madeira na primeira linha dos materiais de construção.

2. COBERTURAS DE MADEIRA

As coberturas, que podem ser de duas, três, quatro, ou mais águas, possuem na sua estrutura principal asnas. As asnas são uma espécie de vigas armadas em forma triangular, constituídas por várias peças de madeira. As asnas de madeira podem ter inúmeras configurações

geométricas. A escolha da sua tipologia recai sobre vários fatores entre os quais se destacam o vão a cobrir, a natureza das ações a considerar, a inclinação da cobertura, a arquitetura e as operações de montagem e execução. O espaçamento normal entre as asnas, de eixo a eixo, é da ordem de 3 a 4 metros. Sobre as asnas repousam as madres, os rincões e a estrutura secundária de suporte à cobertura (varedo mais ripado).

Quanto à posição das várias peças que formam o conjunto da asna: a *linha* fica sempre em posição horizontal, as *pernas* assentam sobre a linha em posição inclinada para boa formação das vertentes do telhado, o *pendural* verticalmente no vértice do telhado formado pelas pernas e as *escoras* ficam inclinadas, ligando as pernas ao pendural.

Na Figura 1 apresentam-se as tipologias de asnas tradicionais de madeira mais comuns em Portugal.

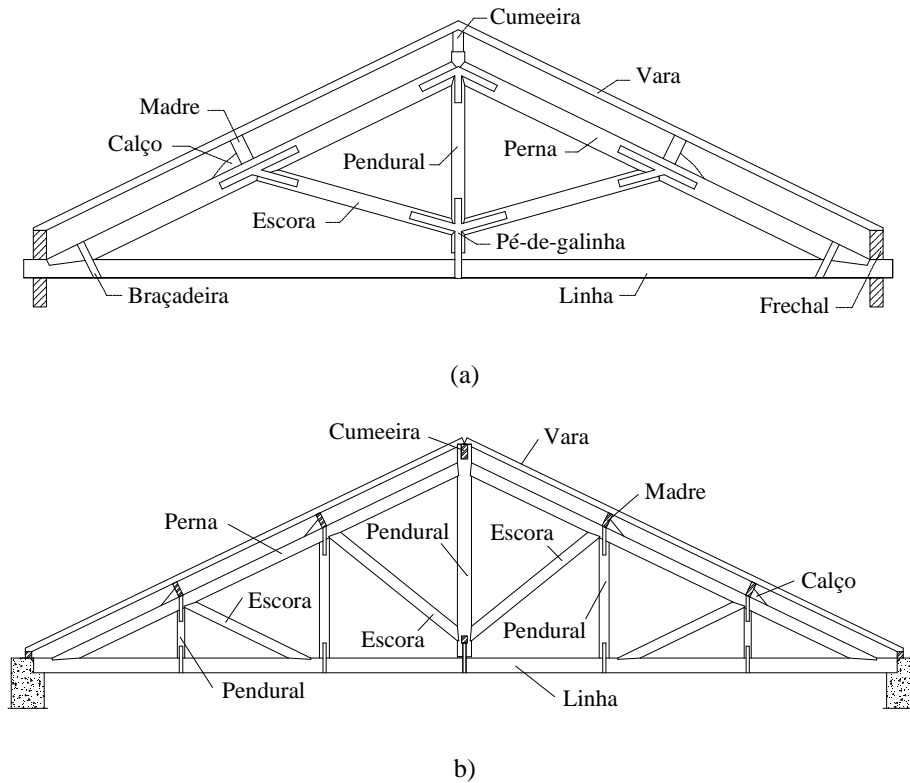


Figura 1 – Tipologias de asnas tradicionais de madeira; (a) Asna simples; (b) Asna Composta.

Quanto às espécies de madeira, o Pinho (*Pinus pinaster*, Ait.), o Castanho (*Castanea sativa*, Mill.) e o Eucalipto (*Eucalyptus globulus* Labill.) são as mais comuns. O Castanho é normalmente associado às obras das ordens eclesiásticas (mosteiros e igrejas). Como madeira mais durável, está presente nas construções mais antigas. O Eucalipto nos últimos anos ganhou importância especialmente por ser uma madeira barata e disponível. O Pinho nacional sempre foi amplamente usado no sector da construção.

As ligações entre os vários elementos são realizadas através de entalhes, podendo possuir mecha e respiga, executadas de forma que os esforços são transmitidos por compressão e atrito. Este tipo de entalhe pode ser efetuado com dente simples, anterior ou posterior da peça, ou dente duplo. O correto funcionamento da ligação depende sobretudo da sua tipologia, diretamente relacionada com o tipo e nível de ações de solicitação, bem como a perfeição e minúcia da sua execução. A fim de prevenir possíveis inversões de esforços, muito frequentes em coberturas ligeiras, as ligações são usualmente complementadas com elementos metálicos, que também se destinam a impedir o deslizamento lateral da peça. Enquanto pregos são usados em todas as ligações, as braçadeiras são empregues nas ligações com a linha e os esquadros nas ligações linha-perna e pendural-pernas. Estes elementos metálicos têm normalmente larguras

de 5-6 cm e espessura de 6 mm. Relativamente ao diâmetro dos parafusos de porca que atuam nestas ferragens podem ser de 6, 9 e 12 mm, consoante a categoria de resistência da asna.

2.1. Anomalias mais comuns

Falta de manutenção das estruturas e conceção ou construção errónea são as principais causas da redução do nível de segurança das coberturas tradicionais em Portugal. Problemas associados à presença de elevadas concentrações de teor de água, em particular, junto ao apoios, são patologias usuais.

Um dos mais frequentes erros de conceção prende-se com a existência de esforços de flexão nos elementos da asna, nomeadamente, nas pernas, seja em resultado de uma seleção inadequada da tipologia da asna para o vão a cobrir (Figura 2a) ou pela simples excentricidade existente entre o nó da asna e o ponto de aplicação das cargas (Figura 2b).

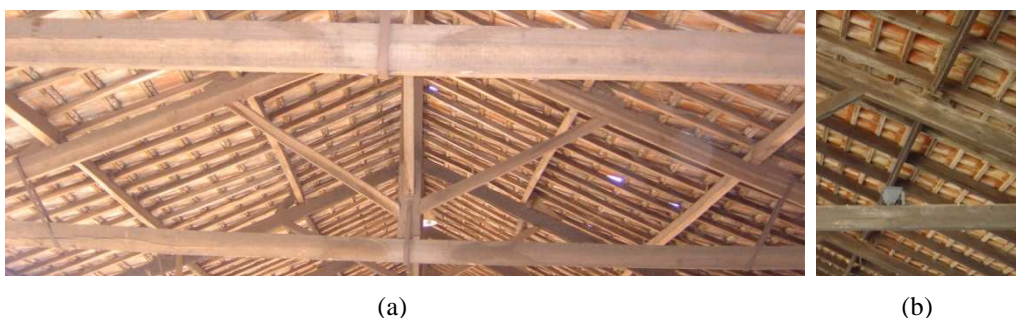


Figura 2 – Exemplos de conceções erradas; (a) Tipologia incorreta para o vão a cobrir; (b) Colocação das madres com excentricidade relativamente ao nó perna-escora.

Apesar de menos significativas, também a excentricidade entre o apoio e o nó perna-linha são usuais. A existência deste género de excentricidade leva à necessidade da colocação de apoios em forma de consolas curtas (cachorros).

Uma fonte importante de incerteza na definição do comportamento estrutural das asnas tradicionais de madeira, em particular, daquelas com tipologia simples, é a ligação entre a linha e o pendural. Apesar das regras práticas de bem construir recomendarem a separação do pendural da linha, é normal encontrarem-se exemplos onde estes dois elementos estão ligados (Figura 3).



Figura 3 – Exemplos de ligações pendural-linha erradas; (a) Pendural pregado à linha; (b) Ligação rígida entre o pendural e a linha.

2.2. Comportamento estrutural

As asnas tradicionais de madeira estão submetidas, essencialmente, a tensões normais decorrentes dos esforços axiais e momentos fletores provocados pelo peso próprio da asna e pelas ações assimétricas (como são exemplo as ações da neve e a ação do sismo). Os elementos mais solicitados são as pernas. A linha e as escoras apresentam apenas esforços axiais e os pendurais apenas possuem esforços de tração. Na verdade, numa estrutura plana, como são as asnas tradicionais de madeira, submetida apenas a cargas pontuais aplicadas diretamente nos nós, sem a introdução de momentos fletores, a distribuição das tensões na estrutura resulta diretamente da geometria. Contudo, este comportamento é facilmente alterável se o sistema estrutural é modificado. Levantamentos de coberturas existentes realizados demonstram grande variabilidade no sistema estrutural das asnas tradicionais de madeira. De facto, apesar das recomendações, intuitivamente desenvolvidas ao longo de séculos pelos mestres carpinteiros, é frequente encontrar exemplos que não obedecem a estas regras de bem construir.

Após uma avaliação das mais representativas variações decorrentes do modelo estrutural assumido no cálculo [1], é sugerido que:

1. A aplicação de cargas concentradas excêntricas aos nós, por exemplo resultantes do posicionamento incorreto das madres, pode comprometer a segurança global da estrutura;
2. A excentricidade dos apoios, relativamente ao nó linha-perna deve ser minimizada. Recomenda-se que a reação de apoio passe pela interceção entre as linhas médias da linha e da perna;
3. A linha deve estar suspensa pelos pendurais. Deve-se usar uma braçadeira metálica, pregada ou aparafusada ao pendural, suspendendo a linha, sem a introdução de qualquer flexão, mas impedindo o deslocamento para fora do plano;
4. Quando se utilizam ligações rígidas entre os pendurais e a linha, a frequência natural e modos de vibração característicos da estrutura vêm significativamente alterados;
5. No caso de ações não-simétricas, como é exemplo, a neve, o vento e o sismo, a influência da rigidez das ligações é importante;
6. O desempenho da ligação perna-linha é crucial, não só pelas elevadas tensões que aí se concentram, mas também porque representam pontos com elevado risco de ataque biológico;
7. Os apoios devem ser capazes de resistir a ações horizontais. As forças de atrito são insuficientes para garantir a segurança perante o sismo.

Apesar da importância destas observações e recomendações, a garantia para um bom comportamento estrutural passa pela seleção da adequada tipologia de asna. Na verdade, em Portugal, as asnas tradicionais de madeira, compostas por elementos esbeltos, com secções que variam entre 6-16 cm x 10-30 cm, foram concebidas para funcionar como estruturas planas, com cargas pontuais aplicadas diretamente nos nós causando apenas esforços axiais nos elementos de madeira.

Na prática, quando o número de nós perna-pendural e perna-escora é inferior ao número de madres (pontos de aplicação das cargas pontuais) a segurança global da asna fica significativamente reduzida. Nestes casos as pernas passam a estar submetidos a importantes esforços de flexão.

2.3. Robustez

A robustez define a capacidade de uma estrutura sustentar danos localizados, sem consequências desproporcionadas. Entendem-se como consequências desproporcionadas as situações em que as consequências causadas por determinado dano estrutural são muito mais graves que o dano em si. Esta ideia levada ao extremo culmina no conceito de colapso progressivo, onde uma rotura localizada se propaga no interior da estrutura, provocando a rotura de elementos estruturais adjacentes, originando uma rotura parcial ou total.

O estudo de coberturas de madeira tradicionais em Portugal, de um ponto de vista da sua segurança, dando particular relevância à robustez estrutural, foi elaborado por [2]. Neste

estudo, foram analisadas as duas tipologias de asnas mais frequentes no nosso país, asna simples e asna composta, que foram analisadas probabilisticamente, recorrendo ao código modelo do JCSS [3], de modo a modelar as ações atuantes na estrutura e as resistências da madeira estrutural. Analisou-se a robustez das tipologias estruturais analisadas, através da introdução localizada de defeitos. A robustez é então aferida, através da comparação do índice de fiabilidade da estrutura original, com o da estrutura onde se introduziu determinado defeito. Verificou-se ao nível da tipologia de asna simples, que a introdução de um qualquer defeito, que leve à rotura de qualquer elemento é altamente prejudicial à segurança estrutural. No entanto, verificou-se que a formação de rótulas plásticas nas pernas sob as madres conduz a níveis de segurança aceitáveis.

No caso da tipologia de asna composta, sendo uma estrutura mais complexa e apresentando maior redundância, verificou-se que os elementos interiores da asna mais centrais (pendural e escoras) são determinantes na ótica da robustez, uma vez que a sua rotura tem graves implicações na segurança estrutural. Os defeitos considerados ao nível das escoras exteriores e dos tirantes interiores apresentam, na ótica da robustez, resultados aceitáveis de fiabilidade estrutural, ao passo que, a remoção dos tirantes exteriores, não implicou qualquer redução da fiabilidade estrutural. Foi ainda demonstrado que, não considerando roturas por deformação excessiva da estrutura, a rotura da parte inferior do pendural, mantendo as ligações com as escoras, mas eliminado o contacto com a linha, é um defeito que não reduz o grau de segurança da estrutura.

Ainda na ótica da robustez, é importante ter presente que, as roturas estruturais em madeiras de baixas resistências, quer sejam por tração, encurvadura ou flexão são frágeis. Assim sendo, a falta de robustez para algumas das verificações realizadas, torna-se ainda mais preocupante.

É ainda importante esclarecer que, apesar de nos dimensionamentos através do método dos coeficientes parciais, se verificar que existem elementos estruturais claramente sobredimensionados (pendurais e escoras), tal facto pode ser bastante benéfico do ponto de vista de robustez. Com efeito, os resultados apresentados demonstram o comportamento ruinoso das estruturas estudadas quando ocorre a rotura dos pendurais e das escoras centrais. Assim, provada a preponderância destes elementos e, apesar dos fracos esforços estruturais a que estes se encontram sujeitos, este sobredimensionamento pode ser entendido como medida preventiva de roturas estruturais por falta de robustez, tal como proposto por [4]. Finalmente, resta abordar as limitações da análise. As limitações prendem-se, essencialmente, com o facto de não terem sido consideradas roturas por excessiva deformação, assim como qualquer outro estado limite de utilização. Mais ainda, o efeito da alteração da geometria na instabilidade perpendicularmente ao plano da estrutura não foi considerado. Outra das limitações do trabalho é a consideração da rigidez das ligações como determinística, devido ao desconhecimento de modelos probabilístico para estes componentes. Mais ainda, não se considerou a segurança das ligações.

3. REFORÇO DE LIGAÇÕES TRADICIONAIS DE MADEIRA

As ações de reforço de coberturas de madeira passam essencialmente pelo reforço das ligações das asnas. Por outro lado, a dificuldade em prever o real comportamento das suas ligações geralmente conduz a intervenções excessivamente do lado da segurança e intrusivas. É assim, crucial a identificação correta do comportamento real das ligações empregues nas asnas tradicionais de madeira.

Nos últimos anos, vários têm sido os estudos realizados na Universidade do Minho com vista ao estudo e caracterização do comportamento das ligações tradicionais de madeira [5-7]. Aqui apresenta-se um estudo experimental que pretende salientar a importância do conhecimento do comportamento semi-rígido das ligações típicas em asnas tradicionais de madeira e algumas soluções possíveis para a melhoria do seu desempenho.

3.1. O programa de ensaios

A campanha de ensaios foi realizada no Laboratório de Ensaio de Estruturas (LEST), do Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho, e inclui ensaios à escala real de ligações tradicionais de madeira de dente simples. Foram estudadas ligações representativas da ligação linha-perna, de Pinho bravo (*Pinus pinaster*, Ait.), com um ângulo de abertura de 30° e 60°. Ligações originais, ou seja, não reforçadas, numa primeira fase, e posteriormente ligações reforçadas foram submetidas a ensaios monotónicos (abertura de ângulo: Monot.⁺ e fecho do ângulo: Monot.⁻) e cíclicos. Entre as ligações não reforçadas, avaliou-se ainda a influência do nível de tensão de compressão da perna (σ_c) no comportamento da ligação. Para cada parâmetro avaliado realizaram-se ensaios sobre 3 provetes. Os ensaios das ligações foram precedidos de uma campanha de ensaios de caracterização da madeira [8-9] utilizada na sua construção. A Tabela 1 resume os ensaios realizados sobre as ligações.

Tabela 1 – Ensaios realizados.

Ligação	α (°)	σ_c (MPa)	Ensaio
Não reforçada	30 e 60	1.4 e 2.5	Monot. ⁺
			Monot. ⁻
			Cíclico
Reforço	30 e 60	1.4	Monot. ⁺
			Monot. ⁻
			Cíclico

3.2. Caracterização da madeira e geometria da ligação

Procedeu-se à caracterização da madeira (Pinho bravo) utilizada nas ligações ensaiadas. Ainda na carpintaria, o Pinho foi classificado visualmente como pertencente à Classe EE, de acordo com a Norma Portuguesa NP 4305 [8]. No Laboratório, usando alguns provetes recolhidos durante a execução das ligações, foram realizados ensaios de caracterização da resistência e do módulo de elasticidade, em flexão e em compressão, na direção paralela às fibras, segundo as instruções da EN 408 [9]. A ligação analisada pretende representar a ligação entalhada entre elementos de madeira mais frequente nas estruturas tradicionais correntes em Portugal: madeira de Pinho bravo; ângulo de abertura de 30° e 60°; dente simples sem mecha e respiga; e secção transversal de 80 x 200 mm² para a linha e para a perna, Figura 4.

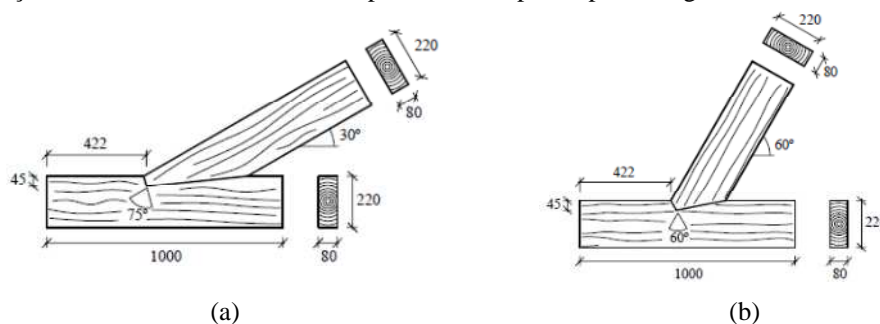


Figura 4 – Geometria das ligações ensaiadas (dimensões em milímetros); (a) ângulo de 30°; (b) Ângulo de 60°.

3.3. Esquema de ensaio e instrumentação

As ligações foram ensaiadas com recurso a dois atuadores controlados independentemente, um horizontal e um vertical. O atuador vertical, alinhado com o eixo da perna, permite aplicar um

esforço de compressão na perna constante durante todo o ensaio, N , simulando o esforço axial na perna devido às cargas permanentes da cobertura. O atuador horizontal, posicionado a 70 cm em relação ao centro da ligação, permite a aplicação de forças cíclicas transversais. Os dois atuadores utilizados têm uma capacidade máxima em força de 50 e 200 kN, e um curso máximo de 160 e 50 mm, respetivamente. Ao longo do ensaio registaram-se as evoluções de força (F) e de deslocamento (d). O esquema geral de ensaio é apresentado na Figura 5, onde se representam as células de força e os LVDT's (Linear Voltage Differential Transducers).

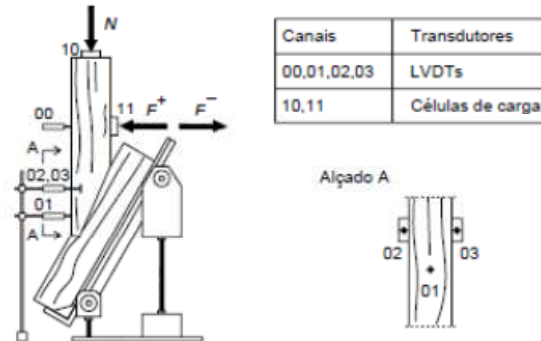


Figura 5 – Esquema de ensaio e instrumentação adotados.

3.4. Procedimento de carga

Os ensaios foram controlados em deslocamento ao nível do canal 00, aplicando um deslocamento máximo de 50 mm a uma velocidade de 0.028 mm/s. Inicialmente, foi aplicada uma força de compressão na perna, que se manteve constante durante todo o ensaio. De seguida, aplicou-se a força transversal na perna, através do atuador horizontal. Convencionou-se como direção positiva da força transversal (F^+ e d^+) aquela que corresponde à abertura da ligação, e a direção negativa (F^- e d^-) aquela que produz o fecho do ângulo da ligação. Nos ensaios monotónicos, após a aplicação da força de compressão na perna, impôs-se o deslocamento crescente até 50 mm na direção pretendida. Nos ensaios cíclicos, as ligações foram submetidas a ciclos de carga e descarga, de acordo com o procedimento patente na norma EN 12512 (2001). A sequência de carregamento incluiu um ciclo na gama $[0.25 d_e^+; 0.25 d_e^-]$; um ciclo na gama $[0.50 d_e^+; 0.50 d_e^-]$; três ciclos na gama $[0.75 d_e^+; 0.75 d_e^-]$; três ciclos na gama $[(1+n) d_e^+; (1+n) d_e^-]$ com $n=0, 1, 2, \dots$, até à rotura da ligação. O valor de referência do deslocamento elástico limite para cada direção, positivo (d_e^+) e negativo (d_e^-), foi determinado com base nos resultados dos ensaios monotónicos. Nas ligações não reforçadas foram considerados dois níveis de força de compressão na perna, 25 e 44 kN, que correspondem a valores de tensão de 1.4 e 2.5 MPa, respetivamente. Estes dois níveis de tensão de compressão foram definidos com base nos resultados de análises numéricas realizadas previamente [1], para as ações permanentes (1.4 MPa) e para o Estado Limite de Utilização (2.5 MPa), de acordo com as ações preconizadas no RSA (1983) [10].

3.5. Soluções de reforço estudadas

O reforço das ligações em estruturas de madeira poderá repor o contacto entre os elementos contíguos, desunidos pela diminuição das forças de compressão e/ou pela deformação da estrutura. Em zonas de perigosidade sísmica moderada/alta, em particular, o reforço afigura-se necessário para garantir estabilidade e adequado comportamento da ligação para as ações cíclicas. As três soluções de reforço analisadas são baseadas em técnicas tradicionais: o esquadro, o varão e a braçadeira (Figura 6). O uso de esquadros metálicos, aplicados nas duas faces da ligação de elementos em asnas de madeira, é uma técnica de reforço tradicional da construção portuguesa. Neste estudo, considerou-se o uso de esquadros metálicos,

materializados por duas chapas soldadas, em forma de V. Cada chapa (S235 JR) tem uma largura de 50 mm e espessura de 5 mm. Os esquadros foram fixados através de parafusos de 6 mm de diâmetro. Uma solução de reforço, mais atual, consiste na inserção de um varão metálico no interior da ligação de forma a este absorver parte do momento que aí se desenvolve. O uso de um varão roscado (S235 JR) de diâmetro igual a 12 mm, colocado no interior da ligação, na direção normal à linha foi assim estudado neste trabalho. O varão possuía em cada uma das suas extremidades uma porca para aperto a uma chapa de 5 mm de espessura (dimensões: 70 x 30 mm²) colocada sobre a superfície da madeira. O uso de braçadeiras, atualmente em desuso, foi muito frequente na construção de coberturas no século XIX.

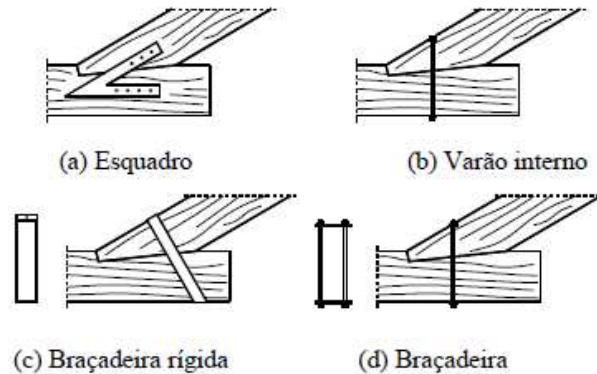


Figura 6 – Soluções de reforço estudadas.

Foram estudadas duas versões atualizadas desta técnica: a) ligação cintada com recurso a uma braçadeira rígida, constituída por uma cinta metálica (S235 JR) de 50 mm de largura e 5 mm de espessura, colocada na direção normal à perna; e, b) ligação cintada realizada com duas chapas metálicas (S235 JR), uma inferior à linha e outra superior à perna, com dimensões de 40 x 159 mm² e 10 mm de espessura, ligadas através de dois varões roscados de 12 mm de diâmetro. Nesta última solução, os varões de aperto nas chapas, com anilha e porca, permitem o controlo da força instalada e eventual reaperto ao longo da vida útil da ligação. A primeira solução, designada por braçadeira rígida, foi apenas analisada para o caso das ligações com ângulo de 30°.

3.6. Resultados dos ensaios

As ligações em asnas tradicionais de madeira e, particularmente, a ligação linha-perna, mesmo quando não é previsto qualquer reforço, exibem uma capacidade de transmissão de momentos significativa. Os resultados dos ensaios experimentais (Figura 7) mostram que esta capacidade depende do nível de tensão de compressão na perna e do ângulo da ligação, como também de outros parâmetros como: a profundidade do entalhe [7,11]; a largura dos elementos (perna ou linha); e o coeficiente de atrito [7,12]. Como se esperava, as curvas força-deslocamento resultantes dos ensaios cíclicos mostram um comportamento assimétrico (Figura 8). A dissipação de energia apenas ocorre quando o ângulo da ligação tende a fechar (direção negativa). O escorregamento da perna quando puxada na direção negativa, é o principal mecanismo responsável pela dissipação de energia. Contudo, as curvas força-deslocamento são não-lineares em ambas as direções. Quando se aumenta a tensão de compressão aplicada na perna (Figura 8), o desenvolvimento das curvas de comportamento força-deslocamento permanece idêntico, registando-se apenas um aumento dos valores máximos da força. A energia dissipada aumenta com a tensão de compressão na perna.

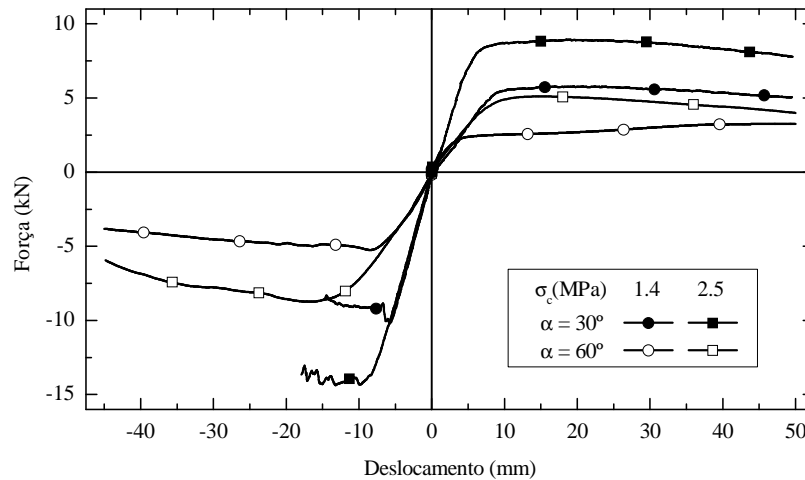


Figura 7 – Efeito do ângulo da ligação e da tensão de compressão na perna no comportamento sob carregamento monotónico das ligações não reforçadas.

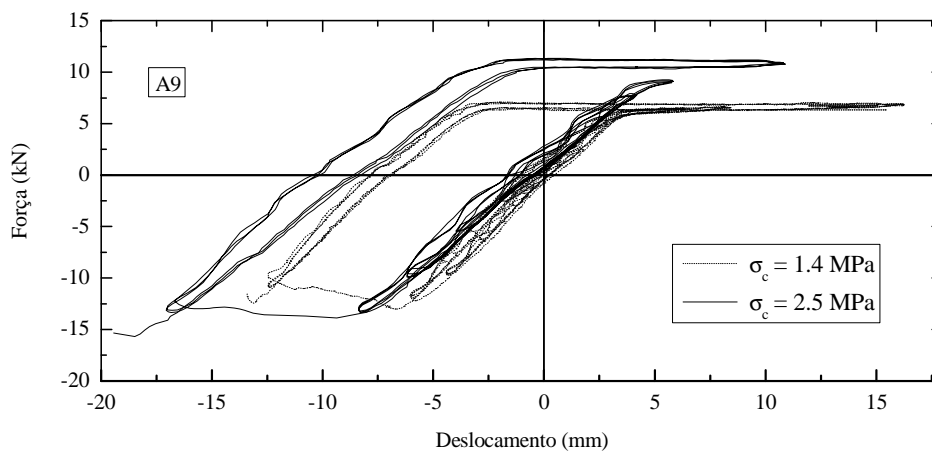


Figura 8 – Efeito da tensão de compressão na perna no comportamento sob carregamento cíclico das ligações não reforçadas com ângulo de 30°.

Comparando os resultados experimentais obtidos, em termos de curva força-deslocamento, das ligações não reforçadas com as ligações reforçadas, facilmente se conclui que todas as soluções de reforço estudadas são eficientes: a capacidade resistente da ligação vem substancialmente aumentada, sendo a rigidez superior, em particular na direção positiva. Contudo, a vantagem mais importante das soluções de reforço de ligações estudadas, quando comparadas com as originais não reforçadas, é o ganho ductilidade (Figura 9). O comportamento frágil das ligações não reforçadas quando o ângulo da ligação tende a fechar (direção negativa), é transformado num comportamento tipicamente dúctil, para qualquer solução de reforço. Na direção positiva, a solução de reforço com recurso à braçadeira é a solução menos eficiente em termos de capacidade resistente.

Na direção negativa de carregamento, a solução de reforço menos eficiente é a que recorre à braçadeira metálica em termos de ductilidade e resistência. Na verdade, na direção negativa, as ligações reforçadas com braçadeiras rígidas atingiram a rotura antes que o valor máximo do deslocamento imposto (50 mm) fosse atingido. Como já foi dito, todas as soluções de reforço consideradas resultaram num melhoramento do comportamento histerético das ligações. Essa melhoria é traduzida pelo aumento substancial do coeficiente equivalente de amortecimento viscoso (V_{eq}).

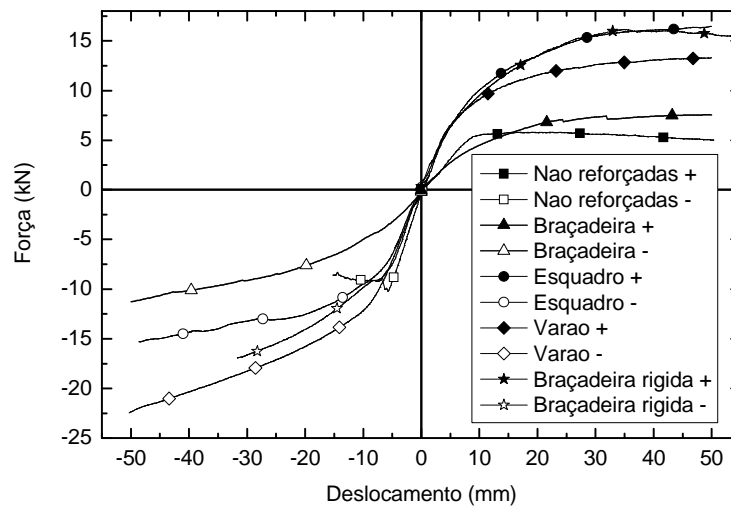


Figura 9 – Curvas força-deslocamento médias das ligações não reforçadas e reforçadas obtidas nos ensaios monotônicos ($\sigma_c = 1.4$ MPa); (a) ângulo de 30°; (b) ângulo de 60°.

O reforço não só aumentou a capacidade resistente das ligações, como garantiu também a estabilidade do comportamento das mesmas para um maior número de ciclos de carga. Com o aumento do número de ciclos com comportamento estável, maior é a capacidade de dissipação de energia (E_d). Como exemplo, na Tabela 2 e na Figura 10 apresentam-se os principais resultados e as curvas força-deslocamento obtidas nos ensaios cíclicos de ligações com ângulo de 30 e 60°, respectivamente.

Tabela 2 – Resultados dos ensaios cíclicos de ligações com ângulo de 30°.

Ligação	σ_c (MPa)	F_{max} (kN)	E_d (kJ)	V_{eq} (%)	
Não reforçada	1.4	11.57	230	2.45	
	2.5	17.00	380	3.96	
Reforço	1.4	Esquadro	18.09	1859	14.57
		Varão	21.08	1877	11.28
		Braçadeira rígida	25.47	2874	6.85
		Braçadeira	11.26	554	12.83

As ligações foram designadas U se não reforçadas, S, B, BSR e BS se reforçadas com esquadro, varão, braçadeira rígida e braçadeira, respectivamente. O primeiro algarismo refere-se ao ângulo, 3 e 6 para 30° e 60° respectivamente, e o segundo designa a numeração dos provetes (os seis primeiros foram ensaios monotonicamente e os três restantes foram submetidos a ensaios cíclicos).

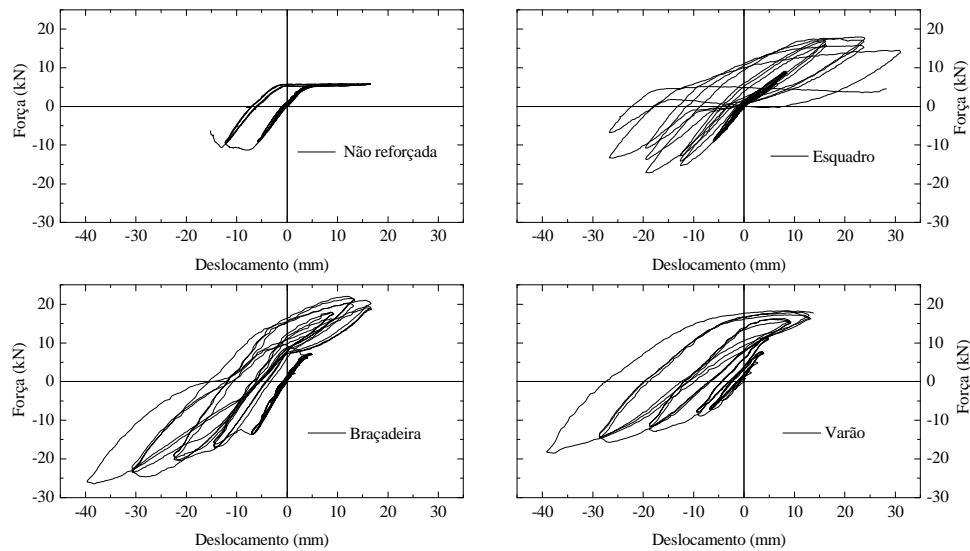


Figura 10 – Curvas força-deslocamento obtidas nos ensaios cíclicos para as ligações com ângulo de 30° e $\sigma_c = 1.4$ MPa.

Na Figura 11 representam-se os modos de rotura mais comuns exibidos pelas ligações reforçadas no final dos ensaios cíclicos.

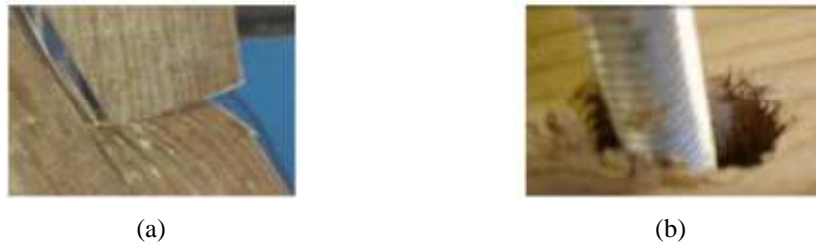


Figura 11 – Roturas mais comuns obtidas nos ensaios cíclicos das ligações reforçadas; (a) esmagamento localizado na linha nas ligações com braçadeira; (b) flexão do varão com esmagamento localizado.

4. ENSAIOS À ESCALA REAL DE ASNAS

Duas asnas tradicionais de madeira, de tipologia simples, recuperadas de uma demolição na província de Trento, foram ensaiadas no Laboratório da Universidade de Trento. Previamente aos ensaios de carga, foi conduzida uma vasta campanha de inspeção e diagnóstico dos vários elementos constituintes das asnas. Os elementos foram inspecionados, classificados visualmente e ensaios não-destrutivos foram utilizados para caracterizá-los, nomeadamente, o pilodyn®, Registógrafo®, Silvatest® e o ensaio de Turrini-Piazza®. Mais detalhes sobre esta fase de inspeção e diagnóstico pode ser consultados em [7,13].

As asnas foram submetidas a ensaios cíclicos, sob carregamento simétrico e assimétrico, considerando os estados limite de serviço e último. Com base na resposta das asnas durante estes ensaios, foram concebidas medidas de reforço das mesmas de forma a melhorar a sua performance.

4.1. Esquema de ensaio, instrumentação e procedimento de carga

As asnas de madeira foram ensaiadas sob carregamento cíclico com duas cargas pontuais, aplicadas diretamente sobre a ligação perna-esгора. Carregamentos simétricos e assimétricos foram realizados para o estado limite de serviço e último (SLS e ULS, respectivamente). Como ações foi considerado o peso próprio da cobertura original e a ação da neve correspondente ao local onde as asnas foram recuperadas, Lago Caldonazzo (500m de altitude).

Inicialmente, as asnas foram submetidas a uma série de ensaios de carga e descarga, com o objetivo de ajustar todos os elementos da asna entre si, reduzindo ao mínimo as folgas nas ligações. O primeiro passo dos ensaios propriamente ditos, foi a aplicação da carga correspondente ao peso próprio da cobertura de madeira (material de cobertura e subestrutura). Depois disso, a carga remanescente correspondente a cada caso de carregamento foi dividida em quatro etapas. Portanto, a carga foi atingida após 4 ciclos de carga e descarga mantendo constante como carga mínima aquela correspondente ao peso próprio da cobertura. Em cada ensaio, este procedimento de carga foi repetido por três vezes (Figura 12).

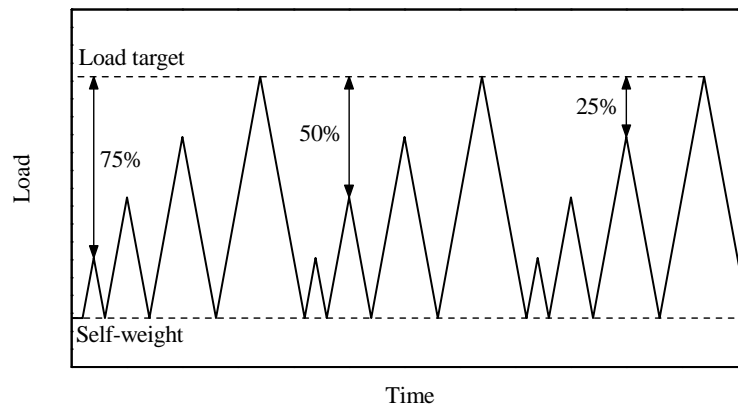


Figura 12 – Procedimento de carga.

Durante os ensaios foram medidos o deslocamento principal global das asnas, o deslocamento relativo entre o pendural e a linha e a rotação de cada ligação, utilizando para isso catorze transdutores (Figura 13).

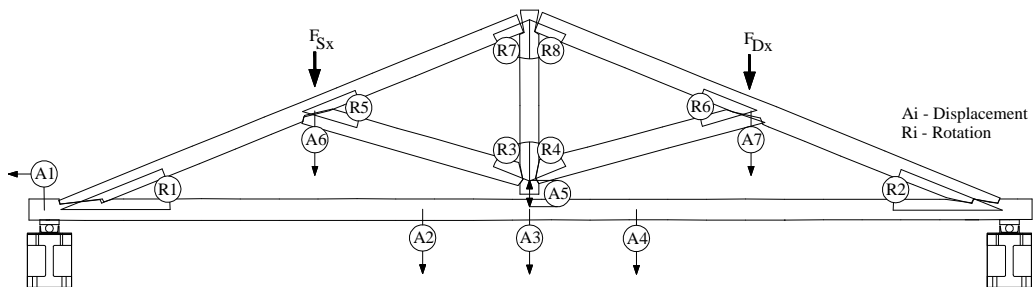


Figura 13 – Instrumentação.

Dois macacos hidráulicos manuais, suportados por uma armação de aço fixadas à laje de reação do Laboratório, foram utilizados para a aplicação das cargas. Como as condições de apoio, utilizaram-se dois apoios restringindo o deslocamento vertical com o apoio direito restringido também o movimento horizontal. A Figura 14 mostra uma visão geral do esquema de ensaios e a instrumentação utilizada.



Figura 14 – Esquema de ensaios e instrumentação utilizada.

4.2. Avaliação do comportamento das asnas

A resposta de ambas as asnas sob os diferentes carregamentos realizados é fortemente dependente da variabilidade de secções transversais que se verifica ao longo dos elementos constituintes das asnas, assinalada na fase de inspeção [13]. Os resultados dos testes mostram que, mesmo sob condições de carga simétrica, o comportamento de ambas as asnas é assimétrico. Esta conclusão é mais evidente na resposta de Asna 1 sob carga simétrica correspondente a SLS (Figura 15).

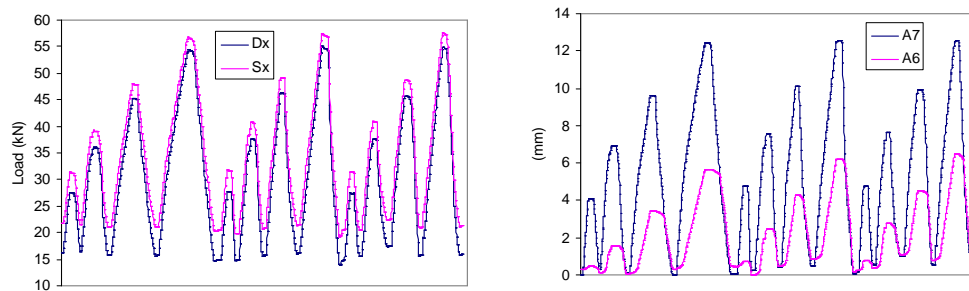


Figura 15 – Comportamento assimétrico da Asna 1 sob carregamento simétrico (SLS).

A ligação pendural-linha, materializada por um varão roscado de 20 mm de diâmetro fixo no pendural, alinhado pelo eixo longitudinal desde elemento, que atravessa a linha por um orifício maior que o seu diâmetro, com uma porca larga na sua extremidade (para além da linha), funcionou corretamente. Ou seja, a ligação foi eficiente em suspender a linha no pendural, mas permitindo que o pendural se aproxime da linha sem a introdução de qualquer esforço indesejável (Figura 16).

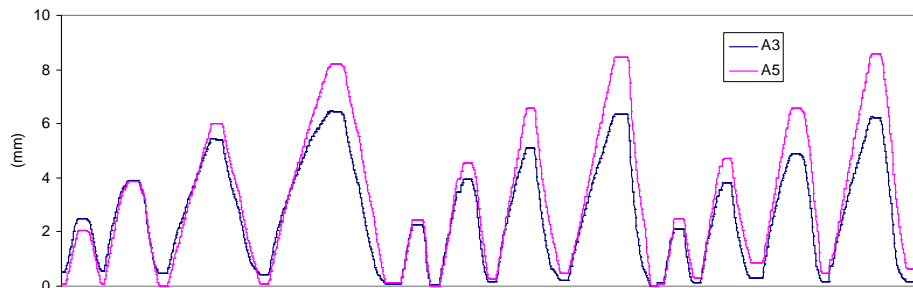


Figura 16 – Comportamento da ligação entre o pendural e a linha sob carregamento simétrico.

Sob carregamento assimétrico, o comportamento das asnas assimétrico já apontado, é enfatizado. Comparando as leituras dos canais A6 e A7 (Figura 17a) sob carregamento assimétrico, verifica-se uma grande assimetria das leituras, denotando distorção da asna, que é ainda comprovada com as leituras registadas por M1 (Figura 17b) que mede o deslocamento horizontal na base do pendural.

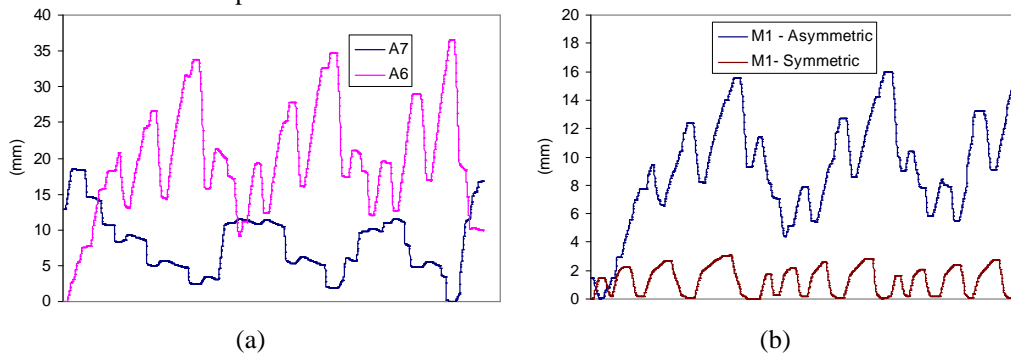


Figura 17 – Comportamento assimétrico sob carregamento assimétrico; (a) comparação entre as leituras dos canais A6 e A7; (b) comparação do deslocamento horizontal do pendural sob carregamento simétrico e assimétrico.

A ligação pendural-linha apresenta rigidez de rotação no plano da asna bem como no plano ortogonal (fora do plano da asna). Portanto, este género de ligação com varão roscada previnem também o movimento para fora do plano (Figura 18).



Figura 18 – Comportamento da ligação pendural-linha; (a) flexão do varão roscado no plano da asna; (b) flexão do varão roscado no plano ortogonal à asna.

4.3. Reforço da Asna 1

Depois dos ensaios, procedeu-se ao reforço das asnas. Aqui, por limite de páginas, apenas se apresenta o reforço da Asna 1. Este passou essencialmente pelo reforço da ligação pendural-linha de forma a evitar os movimentos para fora do plano observados durante os ensaios anteriores. Para o efeito, aparafusou-se um perfil UPN ao pendural de forma que os movimentos relativos (para fora do plano da asna) deste elemento relativamente à linha ficassem impedidos (Figuras 19a e 19b).

Com o esperado aumento da capacidade de carga da asna, decidiu-se reforçar-se as ligações perna-linha de forma a evitar eventuais roturas preliminares nestas ligações. Para o efeito usou-se um varão roscado M16 na ligação perna-linha e para reforçar a resistência ao corte do dente da linha, colocaram-se, em quincôncio, 12 parafusos 6x200 nesta zona da linha (Figura 19c).

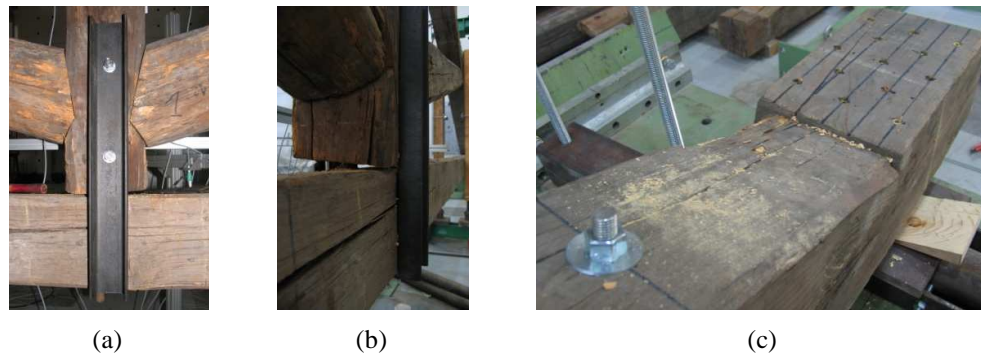


Figura 19 – Reforço da Asna 1; (a) colocação de um perfil UPN de forma a prevenir os deslocamentos para fora do plano da ligação pendural-linha; (b) colocação de um varão roscado na ligação perna-linha com reforço ao corte com parafusos do dente.

Pretendeu-se de seguida repetir os ensaios agora para a asna reforçada. Contudo, apenas o ensaio simétrico correspondente ao ULS. No final deste ensaio, os danos localizados numa das ligações perna-linha impediu a realização dos ensaios em carregamento assimétrico. Foi então decidido fazer um ensaio final até à rotura da asna. É de referir que a carga máxima atingida neste último ensaio é inferior àquela obtida no ensaio anterior. Apesar das medidas de reforço tomadas, estas não foram eficientes dado a rotura local que se verificou numa das ligações perna-linha. Esta rotura sucedeu por falta de resistência ao corte do dente. Apesar de se terem colocado parafusos para reforçar especificamente este mecanismo, dado que a madeira naquela zona estava já bastante degradada, apresentado forte fendilhação, os parafusos não foram capazes de manter a integridade da zona de corte (Figura 20a). No entanto, é importante salientar que este mecanismo foi ainda agravado pela rotura do dente posterior da ligação perna-linha (Figura 20b). Com este movimento da perna, a ligação central pendural-escoras desagregou-se (Figura 20c) enquanto o varão colocado no reforço da ligação perna-linha, pela simples deformação, ter ficado severamente fletido (Figura 20d).

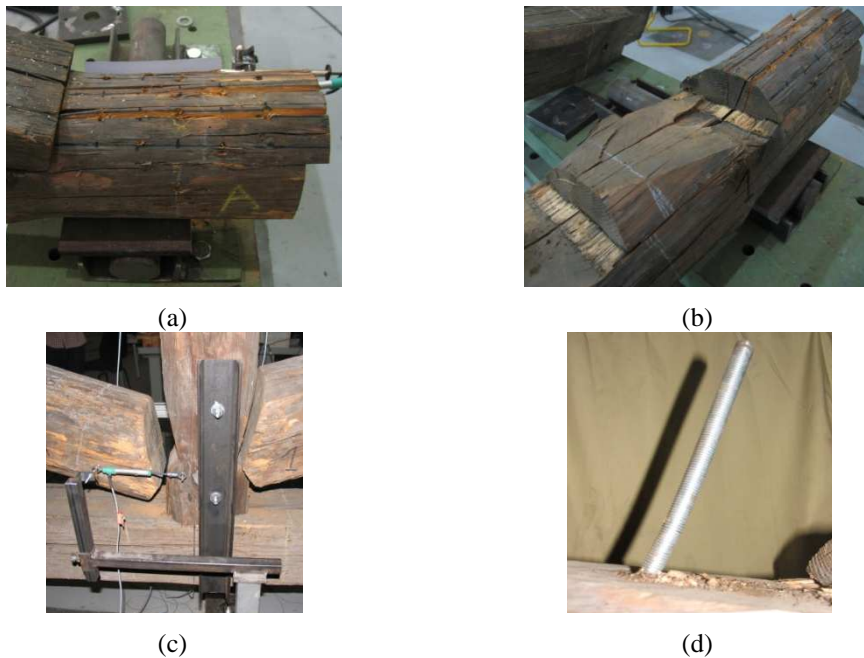


Figura 20 – Rotura Asna 1; (a) rotura por corte do dente da ligação perna-linha; (b) rotura por corte do dente posterior; (c) desmembramento da ligação pendural-escoras; (d) flexão do varão colocado como reforço da ligação perna-linha.

5. CONCLUSÕES

Nas asnas tradicionais de madeira, como sistema articulado plano, a aplicação das cargas que não seja nos seus nós, como é exemplo a colocação incorreta das madres (de forma excêntrica relativamente ao nó perna/escora), pode colocar em risco a segurança da estrutura. Ficou ainda demonstrado a importância da adoção de modelos que tenham em conta o comportamento semi-rígido das ligações na fase de dimensionamento. O reforço das ligações tradicionais, normalmente executado pela adição de elementos metálicos, é indispensável para assegurar o comportamento estável destas, em particular, quando sujeitas a solicitações sísmicas, podendo surgir inversão de esforços na ligação. Todas as soluções de reforço analisadas, que representam versões actuais de técnicas tradicionais, revelaram-se eficientes no melhoramento do comportamento global da ligação. Além das ligações reforçadas exibirem maior capacidade resistente e rigidez, apresentam uma melhoria substancial na ductilidade. Garantiram ainda a estabilidade das ligações para um maior número de ciclos de carga, resultando numa melhoria significativa da capacidade de dissipação de energia, traduzido num aumento considerável do coeficiente equivalente de amortecimento viscoso.

6. REFERÊNCIAS

- [1] Branco J.M., Cruz P., Piazza M., Varum H., Portuguese Traditional Timber Roof Structures. *9th World Conference on Timber Engineering*. August 6-10, Portland, Oregon, USA, 2006.
- [2] Vilarinho T., Neves L.A.C., Branco, J.M. (2011), Robustness analysis of traditional timber trusses. *SHATIS'11 International Conference on Structural Health Assessment of Timber Structures*. Lisbon, Portugal. URI: <http://hdl.handle.net/1822/14005>
- [3] JCSS, 2006, *Probabilistic Model Code: Part 3: Resistance Models – 3.5 Properties of Timber*. Joint Committee on Structural Safety. Internet Publication: www.jcss.ethz.ch.
- [4] Starossek U., Wolff M., Design of Collapse-Resistant Structures. *JCSS and IABSE Workshop on Robustness of Structures*, November, 28-29, 2005 BRE, Garston, Watford, UK.
- [5] Feio A.O., Saporiti J.M., Lourenço P.B., Capacity of a traditional timber mortise and tenon joint. *SAHC 2008 - Structural Analysis of Historical Constructions*, Bath, UK, 02-04 July, 833-841.
- [6] Branco J., Santos A., Cruz P., Asnas tradicionais de Madeira: evolução, comportamento e reforço com materiais compósitos. *Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas*, Série II, n. 3, Maio 2008, pp. 5-18.
- [7] Branco J.M., *Influence of the joints stiffness in the monotonic and cyclic behavior of traditional timber trusses. Assessment of the efficacy of different strengthening techniques*. Bi-National Ph.D thesis, University of Minho and University of Trento, 2008. <http://hdl.handle.net/1822/8091>
- [8] NP 4305:1995, Structural maritime pine swan timber – Visual grading, CT 14 LNEC.
- [9] EN 408:2003, Timber structures – Structural timber and glued laminated timber – Determination of some physical and mechanical properties. CEN, European Committee for Standardization.
- [10] RSA, Regulamento de Segurança e Ações para Estruturas de Edifícios e Pontes. Dec. – Lei n.º 235/83. Casa da Moeda. 31 Maio, 1983.
- [11] Palma, P., Cruz, H., Oliveira, F.P. e Morais, P.G., Sistema para ensaio de ligações estruturais em madeira. ICM 2007 – A Instrumentação Científica e a Metrologia Aplicadas à Engenharia Civil, 5 de Novembro de 2007, LNEC, Lisboa.
- [12] Parisi M.A., Piazza M., Mechanics of plain and retrofitted traditional timber connections. *J Struct Engrg.*. ASCE, 2000, 126(12): 1395–1403.
- [13] Branco J.M., Piazza M., Cruz P.J.S., Structural analysis of two king-post timber trusses. Nondestructive evaluation and load-carrying tests. *Construction and Building Materials*. 24 (3), 2010, 371-383. <http://hdl.handle.net/1822/13995>